

DOI: 10.3969/j.issn.1004-6933.2013.06.010

# 石羊河流域气候暖湿化变化特征分析

穆尼热·赛买提, 陆宝宏, 艾来提·艾木拉江

(河海大学水文及水资源学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:**根据石羊河流域47年的气温、降水量、干旱指数等资料,分析该流域暖湿化变化特征。研究表明:①近47年来,石羊河流域每10年的年际平均增温达到 $0.32^{\circ}\text{C}$ ,20世纪60—80年代期间,各季节平均气温变暖不明显,年平均气温大多处在负距平。90年代末期到21世纪初期,各季节平均气温均呈上升趋势,冬季增温显著,气温距平从 $-1.04^{\circ}\text{C}$ 上升到 $1.87^{\circ}\text{C}$ 。②降水量总体呈上升趋势,但增长趋势不显著,降水量每10年增长7.1 mm,与西北地区降水增加趋势一致。③年平均干旱指数总体呈下降趋势,但趋势不明显,其干旱指数每10年下降0.98。④通过Mann-Kendall方法验证,1994年为增温突变年,降水没有达到突变水平,1992和1993年为干旱指数下降突变年。研究发现,石羊河流域气候正趋于暖湿化,这将有利于该区绿洲的发展,对当地经济发展极为有利。

**关键词:**气温;降水;干旱指数;暖湿化;石羊河流域

中图分类号:P333.1

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2013)06-0049-06

## Analysis of climate change towards warming-wetting trend in Shiyang River Basin

Munira SAMAT, LU Baohong, Hayrat HAMRAJAN

(College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Based on data on air temperature, precipitation, and the drought index of the Shiyang River Basin over the last 47 years, the warming-wetting trend in this basin was analyzed. The results show the following: (1) The average temperature of the Shiyang River Basin showed an escalating trend at  $0.32^{\circ}\text{C}$  per ten years over the last 47 years. During the period from the 1960s to the 1980s, the seasonal average temperature showed an insignificantly escalating trend and the annual average temperature showed a negative anomaly. During the period from the late 1990s to the early 21st century, the seasonal average temperature showed an increasing trend, which was evident in winter, and the temperature anomaly increased from  $-1.04^{\circ}\text{C}$  to  $1.87^{\circ}\text{C}$ . (2) The precipitation showed an overall ascendant trend, but the rising trend was not significant; the precipitation increased by 7.1 mm per ten years, which was consistent with the increasing trend of the precipitation in the northwestern area. (3) The annual average drought index decreased on the whole, but the decreasing trend was not significant; the reduction rate was  $-0.98$  per ten years. (4) Through the Mann-Kendall test, it was found that the temperature increased abruptly in 1994, the precipitation did not change abruptly, and the drought index decreased abruptly in 1992 and 1993. This study shows that the climate in the Shiyang River Basin is becoming warm and humid, which will facilitate oasis development and economic development in this area.

**Key words:** air temperature; precipitation; drought index; warm-humid; Shiyang River Basin

基金项目:国家自然科学基金(50979023);水利部公益性基金(201201026)

作者简介:穆尼热·赛买提(1987—),女,维吾尔族,硕士研究生,研究方向为水文水资源。E-mail:hmlala@126.com

通信作者:陆宝宏,副教授。E-mail:lubaohong@126.com

近 50 年的实测记录表明,中国西部气温以每 10 年 0.2℃ 的趋势上升,特别在 20 世纪八九十年代升温迅速,90 年代被公认为近 1 000 年来最暖的 10 年<sup>[1]</sup>。第 4 次 IPCC 气候评估报告指出:在近 100 年中地表气温变暖了 0.74℃,其变率在过去的 50 年几乎是过去 100 年的 2 倍。全球大幅度气候变暖,势将导致海洋与陆地水体蒸发和大部分海洋和陆地降水增加,冰川消融增强,河川径流量扩大,洪水灾害加剧,干旱区可能缩小<sup>[2-3]</sup>。任朝霞等<sup>[4]</sup>在近 50 年西北干旱区气候变化趋势研究中发现年平均气温和年降水量变化均呈上升趋势。武金慧等<sup>[5]</sup>对甘肃省近 50 年降水量及气候变化趋势研究结果表明,近 50 年来的平均降水量存在减少趋势,但河西中部、西部地区的降水量表现出增加趋势。气候的变干或变湿取决于降水量和蒸发量的变化速率<sup>[6]</sup>,仅用降水量并不能客观表示气候的干湿状况<sup>[7]</sup>,综合考虑水分收支平衡的湿润指数更能准确说明陆地地表的实际干湿状况。目前,区域干湿状况变化研究成为关注的焦点问题之一<sup>[8-9]</sup>。文献<sup>[10]</sup>研究了天山西部地区近 50 年干旱指数的演变特征,指出近 50 年我国大部分区域平均年干旱指数呈总体下降的趋势,尤以夏季干旱指数下降趋势明显。闫炎等<sup>[11]</sup>指出,反映干湿变化的指标——干燥度指数的变化在不同时间尺度下,不仅不同区域之间的关系不同,其显著程度也不同。新疆南部至西北地区中部、内蒙古中部地区一直处于干旱背景下,20 世纪 90 年代末期开始出现转湿的信号。

石羊河流域位于甘肃省河西地区东部,祁连山北麓,地理位置 104°16′~104°16′E,36°29′~39°27′N,深居大陆腹地,属大陆性温带干旱气候。该流域整体气候特点是:太阳辐射强、日照时间充足、温度差异大、降水少、蒸发强烈、气候炎热、空气干燥。石羊河流域主要行政区属于武威和金昌两市,武威市是该流域主要农业生产地,金昌市是我国著名的有色金属生产基地,两市成为流域水资源利用最集中、程度最高的地区。随着当地农业和金属业的迅速发展,流域水资源供需矛盾尤为突出。尤其近 50 年来,在气候变化和人类活动的双重干扰下、流域环境逐步恶化、引发了水资源短缺、水土流失、冰川萎缩、河川断流等一系列水资源环境问题。因此,研究石羊河流域的气温、降水以及干旱指数的变化规律对该地区的农业和经济发展具有一定的参考作用,其暖湿化特征分析对指导该地区的农业生产和维持生态环境的可持续发展具有实际意义<sup>[12]</sup>。

## 1 资料与方法

石羊河流域气象资料均来源于甘肃省气象局。

考虑资料的一致性和完整性,本文主要选取研究区域内气象站 1959—2005 年 47a 的气象资料。考虑地形地貌条件且观测站均匀分布于各水系,又能保证各站资料的同时性和具有较长的观测序列,因此,选取石羊河流域及附近的 6 个气象站(山丹、永昌、民勤、武威、古浪和乌鞘岭)1959—2005 年的气象资料,资料内容包括逐月温度(观测精度 0.1℃)、逐月降水量和逐月蒸发量(观测精度 0.1 mm)资料。在季节分析中,3—5 月代表春季,6—8 月代表夏季,9—11 月代表秋季,12—2 月代表冬季。

一个地区属于干旱区还是湿润区,通常用年蒸发能力与年降水量的比值表示,即:

$$r = \frac{E}{P} \quad (1)$$

式中: $r$  为干旱指数; $E$  为年蒸发量,mm; $P$  为年降水量,mm。

当  $r > 1$  时,年蒸发量大于年降水量,气候干燥, $r$  值愈大,反映气候愈干燥;当  $r < 1$  时,年降水量大于年蒸发量,气候湿润, $r$  值愈小,反映气候愈湿润。我国以干旱指数将全国划分为 5 个气候带:十分湿润带( $r < 0.5$ )、湿润带( $0.5 \leq r < 1.0$ )、半湿润带( $1.0 \leq r < 3.0$ )、半干旱带( $3.0 \leq r < 7.0$ )和干旱带( $r \geq 7.0$ )<sup>[13]</sup>。

本文气候特征的分析方法主要采用线性倾向估计法和 Mann-Kendall 非参数秩次相关检验法(M-K 法)。M-K 检验法被广泛应用于水文、气象资料的趋势分析与突变分析中。与其他方法相比,其优点在于检测范围较宽、人为因素较少、计算方便、可以明确突变时间并指出突变区域。

M-K 法定义了  $UF_k$  统计量为

$$UF_k = \frac{((S_k - E(S_k)))}{\sqrt{\text{var}(S_k)}} \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

并用其检验时间序列突变点。 $UF_k$  为标准正态分布,它的均值和标准差分别表示为

$$E(S_k) = k(k + 1)/4 \quad (3)$$

$$\text{var}(S_k) = k(k + 1)(2k + 5)/72 \quad (4)$$

其中  $S_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$

$$r_i = \begin{cases} +1 & \text{当 } x_i > x_j \\ 0 & \text{当 } x_i \leq x_j \end{cases} \quad (j = 1, 2, \dots, i) \quad (6)$$

给定显著性水平  $\alpha$ ,若  $|UF_k| > U_{\alpha/2}$ ,则表明时间序列存在明显的趋势变化。 $UF_k$  是按时间序列  $x$  顺序  $x_1, x_2, \dots, x_n$ ,计算出的统计量序列,然后,按时间序列  $x$  逆序  $x_n, x_{n-1}, \dots, x_1$ ,再重复上述过程,计算  $UB_k$  序列,同时使  $UB_k = -UF_k$ ,最后,分别绘出  $UB_k$  和  $UF_k$  曲线图,当  $UB_k$  和  $UF_k$  在临界值为  $\pm 1.96$  ( $\alpha =$

0.05)之间有1个显著交点,则可以认为时间序列产生了突变。当 $UF_k$ 上升大于+1.96或 $UB_k$ 下降小于-1.96,前者表示从低向高突变,后者从高向低突变,并且这个交点就是突变的开端,反之则认为没有突变产生<sup>[14]</sup>。

## 2 研究区气温的变化特征

### 2.1 年际变化

温度能表征一个地方大气的冷热程度。图1为石羊河流域气温距平变化。图1中的气温采用线性倾向估计法得到,47a的每10年的年际平均增温达到 $0.32^{\circ}\text{C}$ ,相关系数为0.6790,通过0.01的显著性水平检验。说明47a来石羊河流域气温明显呈上升趋势,高于每10年年际平均增温 $0.22^{\circ}\text{C}$ 的全国平均水平,这一变化趋势与我国西北地区变化趋势相一致<sup>[15]</sup>,尤以1998年以后的升温最为明显。20世纪60—80年代末年平均气温负距平明显,为相对偏冷期;80年代末到90年代中期为过渡时期,这一时期年平均气温距平较小。90年代中期以后,年平均气温正距平显著增加,为相对偏暖期。

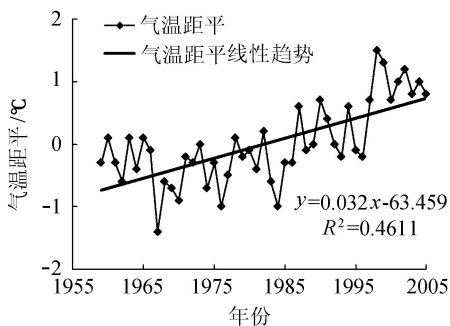


图1 石羊河流域气温距平变化

### 2.2 突变检验

Mann-Kendall 秩次相关检验法可定性地反映温度的年际变化程度。取95%的置信度, Mann-Kendall 标准化变量的临界检验值 $UB_k$ 为 $\pm 1.96$ ;对石羊河流域温度进行 Mann-Kendall 分析,结果如图2所示。从图2中可以看出:1965—1970年,气温呈降低趋势,而从1985年开始以明显增加趋势增加,

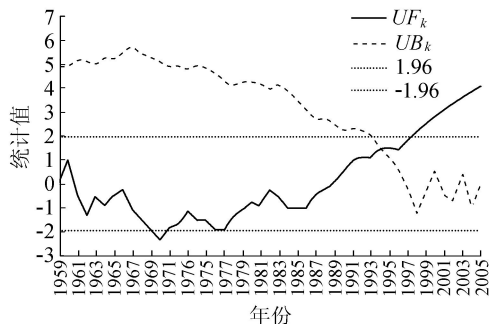


图2 石羊河流域气温 Mann-Kendall 突变检测曲线

自1994年开始,增加趋势更加显著,曲线 $UB_k$ 和 $UF_k$ 在1994年发生相交,由此确定1994年是增温突变年,石羊河流域年平均气温增加趋势明显。这与整个西北地区年平均气温增加并在20世纪90年代存在突变的大背景相一致<sup>[16]</sup>。

### 2.3 平均气温的季节变化

图3为流域不同年代季节的气温距平变化情况。由图3可见,20世纪60—80年代,年内各季节平均气温变暖不明显,四季年平均气温大多处在负距平,为偏冷阶段。20世纪90年代末期开始,四季温度均出现偏高势态,90年代末期跟60年代相比,距平值升高约 $0.7^{\circ}\text{C}$ 。

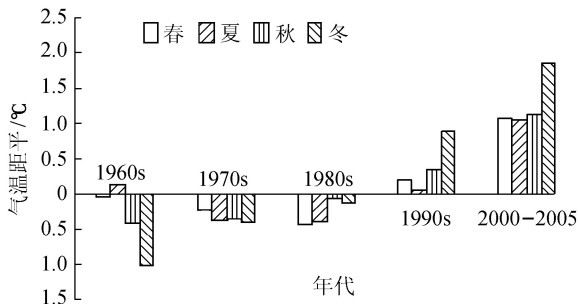


图3 石羊河流域不同年代的气温距平变化

从20世纪90年代末期到21世纪初期石羊河流域各季节平均气温均呈上升趋势,但上升率不同。从线性拟合看,每10年冬季平均气温上升幅度为 $1.8^{\circ}\text{C}$ ,秋季平均气温上升幅度为 $0.9^{\circ}\text{C}$ ,春季约为 $0.6^{\circ}\text{C}$ ,夏季上升幅度最小,为 $0.4^{\circ}\text{C}$ ,冬季气温的升温幅度超过其余季节的气温变化。从历年气温距平来看,冬季气温距平从 $-1.04^{\circ}\text{C}$ 上升到 $1.87^{\circ}\text{C}$ ,相关系数为0.6093,通过0.01的显著性水平检验。由此可见,冬季增温幅度较大,是流域年平均气温变暖的主要贡献者。

### 2.4 气温空间变化

绘制石羊河流域气温空间变化,见图4。气温

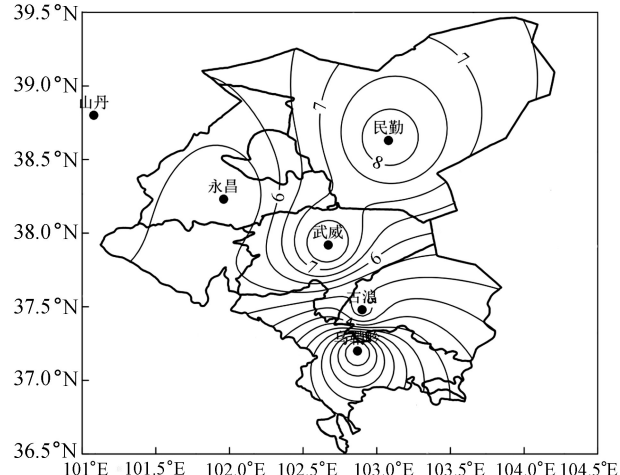


图4 石羊河流域温度空间分布(单位: $^{\circ}\text{C}$ )

等值线密集,说明气温变化剧烈,空间分布不匀,这与该地区高程变化大有关;等值线稀疏表明气温变化幅度小,空间分布较均匀,地形变化也相对较平缓。由图4得知,流域气温呈西南—东北走向,西南温度相对较低,东北温度相对较高。从气象站来看,上游祁连山区乌鞘岭气象站每10年的平均温度变化偏低(0.22℃),而下游民勤气象站(0.38℃)平均温度变化偏高,民勤地区干旱与该地区温度高有密切关系。

### 3 降水量的年际变化

#### 3.1 年际变化

石羊河流域47年来的降水量呈增加趋势,按照线性倾向拟合估计方法计算,其增长幅度为每10年7.1 mm,未达到显著水平。由图5可知,年降水量总趋势是增加的,但年降水量在各个年代、年际的情况是不同的。20世纪60年代,平均距平值分别为-13.1 mm,降水量相对偏少。80年代之后,夏季降水量相对较多,但呈增加趋势不显著,这与我国长江中下游地区、华南地区和西北西部地区趋势一致<sup>[17]</sup>。

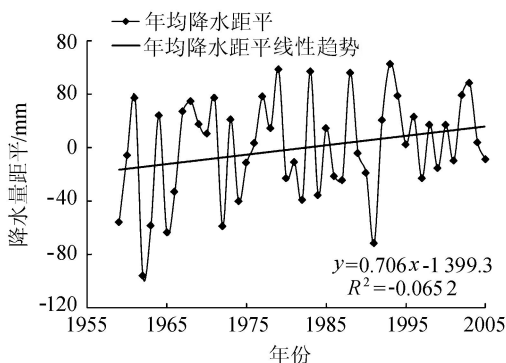


图5 石羊河流域降水距平变化

#### 3.2 突变检验

Mann-Kendall 秩次相关检验法可定性的反映温度的年际变化程度。取95%的置信度, Mann-Kendall 标准化变量的临界检验值为±1.96;对石羊河流域温度进行 Mann-Kendall 分析,从图6可以看出,曲线  $UB_k$  和  $UF_k$  在不同年份发生过相交,但是

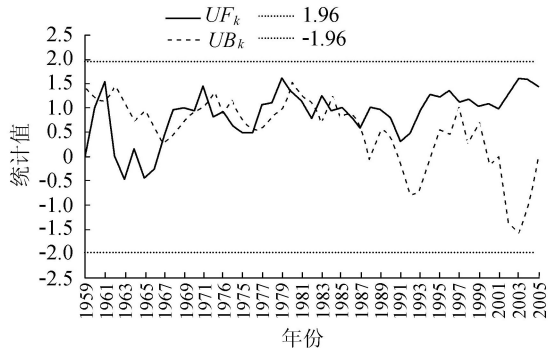


图6 Mann-Kendall 突变检测曲线

没有出现超出临界线的年份,再经过滑动  $t$  检验发现石羊河流域降水没有达到突变水平。

#### 3.3 降水量空间变化

绘制流域降水量的空间分布,见图7。由图7可知,流域降水量空间分布极不均匀,降水量大体上是从西南向东北递减。流域年降水量极值比在1.97~5.23,同样说明流域降水空间分布不均匀,这更有力地说明降水量是由西向东,由南向北递减的。东北地区降水较少影响着民勤盆地的农业生产和生态需水。

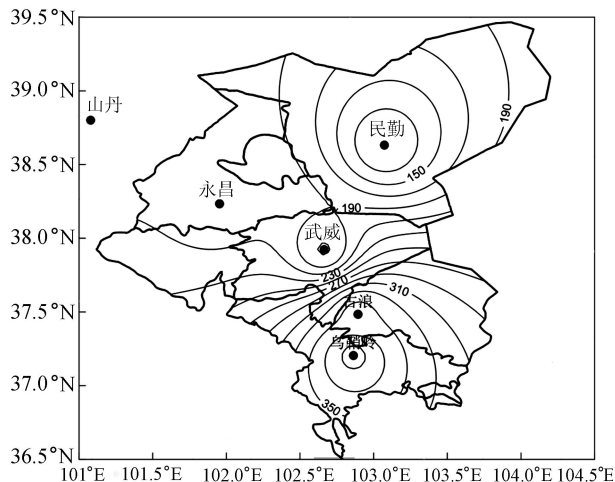


图7 石羊河流域降水量空间分布(单位:mm)

石羊河流域降水的空间不均匀,导致了如今的民勤绿洲北部部分群众撂荒土地,背井离乡,沦为“生态难民”,“罗布泊”现象已经局部显现,民勤绿洲濒临消亡的威胁。

### 4 干旱指数的变化特征

#### 4.1 年际变化

干旱指数是反映气候干湿程度的指标。图8给出了石羊河流域的干旱指数。由图8可见,干旱指数整体呈减小趋势,计算发现石羊河流域干旱指数从20世纪60年代的12.9下降到90年代末期的9.3,每10年线性拟合倾向率为-0.98,通过0.01的显著性水平检验。下降趋势比较平缓。这与我国大

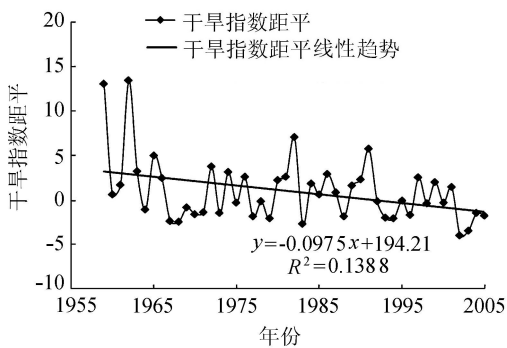


图8 石羊河流域不同年代的干旱指数距平变化

部分地区干旱指数缓慢下降趋势一致<sup>[18]</sup>。

#### 4.2 突变检验

Mann-Kendall 秩次相关检验法可定性地反映温度的年际变化程度。取 95% 的置信度, Mann-Kendall 标准化变量的临界检验值为  $\pm 1.96$ ; 对石羊河流域温度进行 Mann-Kendall 分析, 从图 9 可以看出, 石羊河流域年干旱指数下降趋势不明显,  $UB_k$  和  $UF_k$  曲线在 1967 年到 70 年代末期都发生过相交, 表示在这些年份间发生了干旱指数下降突变, 由于相交点处在临界线附近, 突变不是很明显。同样的  $UB_k$  和  $UF_k$  曲线在 1990 年代开始发生相交, 表示这些年又是一个干旱指数下降突变。再经过滑动  $t$  检验, 确定 1967 年、1992 年、1993 年是突变年。

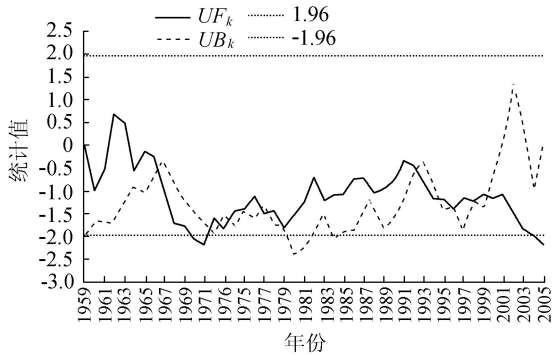


图 9 Mann-Kendall 突变检测曲线

不同年代干旱指数的变化结果见表 1。由表 1 可知, 流域干旱指数从 20 世纪 60 年代的 13.2 减小到 2000 年以来的 9.6, 同样表明流域气候趋于湿润化; 其中, 1960 年代干旱相对较严重, 2000—2005 年干旱程度相对减弱; 干旱指数最大值出现在 1962 年, 其值为 23.9, 最小值出现在 2002 年, 其值为 7.1, 二者差值为 16.8, 表明年平均干旱指数年际间变化较大。

表 1 石羊河流域各年代干旱指数特征值

时段	干旱指数
1960—1969	13.2
1970—1979	10.8
1980—1989	12.3
1990—1999	11.7
2000—2005	9.6
均值	11.9

#### 4.3 干旱指数空间变化

干旱严重制约着石羊河流域的工业生产、生活和生态需水。

从图 10 可以看出, 干旱指数有西南—东北方向的梯度变化, 由西南向东北逐渐增大。西南方向古浪、武威站由于降水较多, 温度较低, 蒸发较少, 因而干旱程度不明显; 东北部的民勤站由于降水少, 温度高, 蒸发剧烈, 从而导致干旱指数较大, 一定程度上

影响了民勤盆地的农业生产和生态恢复。

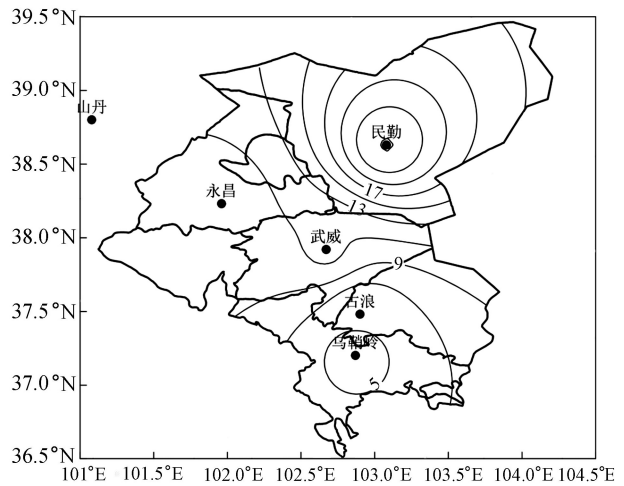


图 10 石羊河流域干旱指数的空间分布

石羊河流域干旱指数的变化与温度、降水、潜在蒸发等因素有关。其中蒸发量受各种因素综合影响, 不同因素之间也相互影响, 所以潜在蒸发的变化成因十分复杂。随着海拔的升高, 气温降低、湿度增大、蒸发量减小。上游祁连山区乌鞘岭气象站和古浪站海拔较高, 蒸发量较小, 分别为 1544.7 mm、1822.7 mm, 干旱指数相对小; 而下游民勤气象站和山丹站海拔相对较低, 蒸发量较大, 分别为 2586.6 mm、2266.2 mm, 进而导致干旱指数大。其变化特征见表 2。

表 2 石羊河干旱指数距平空间变化

站名	海拔高度/m	年均干旱指数	干旱指数距平
民勤	1368	23.1	53.1
山丹	1765	11.5	14.1
武威	1525	11.4	15.3
永昌	1986	9.9	9.5
古浪	2073	5.1	3.0
乌鞘岭	3043	3.9	3.7

## 5 讨论与结论

本文运用线性倾向估计法和 Mann-Kendall 秩次相关检验法对石羊河流域温度、降水及干旱指数的变化趋势进行了分析, 得出如下结论。

a. 在全球变暖的大背景下, 近 47 年来石羊河流域气候变化的总趋势是气温升高, 变化趋势显著; 降水量为增加趋势, 但变化趋势不显著; 干旱指数为下降趋势, 下降趋势平缓, 变化比较稳定。其中气温升高速率为每 10 年 0.32℃, 年降水增加速率为每 10 年 7.1 mm, 干旱指数减少速率为每 10 年 -0.98。因此, 近 47 年来石羊河流域气候存在暖湿化趋势。

b. 石羊河流域的降水年际变化呈增高趋势, 但变化趋势不显著。降水的年内变化特点是: 年内分配不均, 主要集中在 6—9 月份, 非汛期降水量小, 冬季雨雪稀少, 春季降水略多于冬季。空间分布走向



与温度的空间走向一致,由西南向东北降水逐渐减少。气温突变在1994年开始有增温的突变,而降水变化趋势未达到突变水平。

c. 石羊河流域干旱指数总体呈减小趋势,表明流域气候趋于湿润化;1960年代干旱最为严重,2000年以来干旱相对较小。干旱指数空间分布与温度的走向一致,干旱指数在1967年和1992年开始有下降趋势的突变,经滑动 $t$ 检验,突变年份为1967年,1992年,1993年。

综上所述,石羊河流域气温、降水呈增加趋势,但趋势不显著,干旱指数呈减少趋势,促使整个流域气候趋于暖湿化。气温、降水等气候要素以及干旱指数的变化受天文、地理等因素影响,但人为因素的影响越来越突出<sup>[19]</sup>。因此,如何在城市建设、经济发展的同时合理地改善、利用气候资源是重要课题,应该引起全社会的重视,这对石羊河流域尤其是下游民勤地区的生态修复具有重要意义。

#### 参考文献:

[1] 王绍武,董光荣. 中国西部环境特征及其演变[C]//秦大河. 中国西部环境演变评估:第1卷. 北京:科学出版社,2002:49-61.

[2] 施雅风,沈永平,胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨[J]. 冰川冻土,2002,24(3):219-226. (SHI Yafeng, SHEN Yongping, HU Ruji. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in Northwest China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(3):219-226. (in Chinese))

[3] 杨永辉,渡边正孝,王智平,等. 气候变化对太行山土壤水分及植被的影响[J]. 地理学报,2004,59(1):56-63. (YANG Yonghui, WATANABE M, WANG Zhiping, et al. Impacts of temperature and precipitation changes on soil moisture of Taihang Mountains[J]. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(1): 56-63. (in Chinese))

[4] 任朝霞,杨达源. 近50a西北干旱区气候变化趋势研究[J]. 第四纪研究,2006,26(2):299-300. (REN Zhaoxia, YANG Dayuan. The trend of northwest arid climate change research in recent 50 years[J]. Quaternary Sciences, 2006, 26(2):299-300. (in Chinese))

[5] 武金慧,李占斌,沈中原. 甘肃省近50年降水量及气候变化趋势研究[J]. 干旱区资源与环境,2008,22(11):24-29. (WU Jinhui, LI Zhanbin, SHEN Zhongyuan. Variation trend of precipitation and climate factors in Gansu Province for the last 50 years[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008, 22(11):24-29. (in Chinese))

[6] 王菱,谢贤群,李运生,等. 中国北方地区40年来湿润指数和气候干湿带界线的变化[J]. 地理研究,2004,23

(1):45-54. (WANG Ling, XIE Xianqun, LI Yunsheng, et al. Changes of humid index and borderline of wet and dry climate zone in Northern China over the past 40 years[J]. Geographical Research, 2004, 23(1): 45-54. (in Chinese))

[7] 申双和,张方敏,盛琼. 1975—2004年中国湿润指数时空变化特征[J]. 农业工程学报,2009,25(1):11-15. (SHEN Shuanghe, ZHANG Fangmin, SHENG Qiong. Spatio-temporal changes of wetness index in China from 1975 to 2004[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(1): 11-15. (in Chinese))

[8] 吴绍洪,尹云鹤,郑度,等. 近30年中国陆地表层干湿状况研究[J]. 中国科学D辑:地球科学,2005,35(3):276-283. (WU Shaohong, YIN Yunhe, ZHENG Du, et al. Study on the surface dry-wet conditions of China[J]. Science in China Series D: Earth Science, 2005, 35(3): 276-283. (in Chinese))

[9] 吴绍洪,尹云鹤,郑度,等. 青藏高原近30年气候变化趋势[J]. 地理学报,2005,60(1):3-11. (WU Shaohong, YIN Yunhe, ZHENG Du, et al. Climate change in the Tibetan Plateau during the last three decades[J]. Acta Geographica Sinica, 2005, 60(1): 3-11. (in Chinese))

[10] 夏依木拉提·艾依达尔艾力,赵蓉. 天山西部地区近50年干旱指数的演变特征[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2010,8(2):88-96. (XAYMURAT Aydaraili, ZHAO Rong. Special characteristics and long-term trend of aridity index in the west part of the Tianshan Mountains during recent 50 years[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2010, 8(2):88-96. (in Chinese))

[11] 闫炎,赵昕奕,周力平. 近50年中国西北地区干湿演变的时空特征及其可能成因探讨[J]. 干旱区资源与环境,2010,24(4):39-44. (YAN Yan, ZHAO Xinyi, ZHOU Liping. The temporal and spatial characteristics of aridity and wetness variation in Northwest China during recent 50 years and the factor analysis[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010, 24(4):39-44. (in Chinese))

[12] 马金珠,朱中华,于保静. 石羊河流域水环境演化与水资源可持续利用[M]. 兰州:兰州大学出版社,2005.

[13] 王双银,宋孝玉. 水资源评价[M]. 郑州:黄河水利出版社,2008.

[14] 秦年秀,姜彤,许崇育. 长江流域径流趋势变化及突变分析[J]. 长江流域资源与环境,2005,14(5):489-594. (QING Nianxiu, JIANG Tong, XU Chongyu. Trends and abruption analysis on the discharge in the Yangtze Basin[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2005, 14(5):489-594. (in Chinese))

(下转第58页)

精度越高,且数据离散程度越小。但潮流量测验应在保证成果精度的前提下尽可能精简测次,以减少人力、物力和财力的消耗,以达到方案最优及资源合理应用。虽然落潮流 0.5 h 施测 1 次的精度最高,但 1 h 施测 1 次从实际情况及精度要求来看,均比较合理,仍可继续作为长江口落潮流常用测次分布方案。2h 施测 1 次的误差较大,且系统误差偏小,不予采用。

涨潮流 0.5 h 施测 1 次会导致推算的涨潮量系统误差偏小,长江河口下泄入海的净泄量比实际量偏大,进而对长江水资源量的控制产生影响。15 min 施测 1 次可以有效消除系统误差。但研究河段涨潮流流速变化迅速,水深较大,目前常规的涨潮流 0.5 h 施测 1 次在操作时间上已经比较紧张,如要每 10 min 或 15 min 加测 1 次,从实际操作来说比较困难。同时,在实际测量过程中,除非进行连续流速测量,否则很难测得真正的最大流速。今后可考虑采用声学多普勒流速剖面仪(ADCP)等先进仪器设备严格控制潮流量测次布置的系统误差,以期找到更为合理的潮流量测验测次分布方案。

#### 参考文献:

[ 1 ] LINSLEY R K, KOHLER M A, PAULHUS J L H. Hydrology for Engineers [ M ]. New York: McGraw-Hill, 1975.

[ 2 ] 张留柱,赵志贡,张法中.水文测验学 [ M ]. 郑州:黄河水利出版社,2003:276-285.

[ 3 ] 沈鸿金.感潮河流量监测系统研究 [ D ]. 南京:河海大学,2005.

[ 4 ] 钱峰,郭忠良,许浒.长江口潮流量测验的历史与现状 [ J ]. 水利水电快报,2011,32(10):9-13. ( QIAN Feng, GUO Zhongliang, XU Hu. History and current situation of tidal discharge measurement in Yangtze River Estuary

[ J ]. Express Water Resources & Hydropower Information,2011,32(10):9-13. (in Chinese))

[ 5 ] 贡灌海.长江口徐六泾站潮流测验资料分析方法探讨 [ J ]. 人民长江,1999,30(7):23-24. ( YUN Zhanhai. Discussion on how to analysis the tidal measurement data of the Xuliujing hydrometric station in Yangtze River Estuary [ J ]. Yangtze River, 1999, 30 ( 7 ): 23-24. (in Chinese))

[ 6 ] 沈鸿金.多要素相关法提高潮流量测验精度的探讨 [ J ]. 水文,2004,24(4):35-38. ( SHEN Hongjin. Discussion on how to improve tidal discharge measurement precision with multi-factor correlation method [ J ]. Journal of China Hydrology,2004,24(4):35-38. (in Chinese))

[ 7 ] 吕耀光,黄士稳.钱塘江河口区声学多普勒测流及资料整编 [ J ]. 河海大学学报:自然科学版,2010,38(6):682-687. ( LÜ Yaoguang, HUANG Shiwen. Discharge measurement and data compilation in Qiantang River estuary by use of acoustic Doppler current profiler [ J ]. Journal of Hohai University: Natural Sciences,2010,38(6):682-687. (in Chinese))

[ 8 ] 宋志宏,胡国栋.徐六泾潮流量测验及整编技术研究 [ J ]. 水文,1998(2):31-36. ( SONG Zhihong, HU Guodong. The tide discharge measurement and compilation technique research of the Xuliujing hydrometric station [ J ]. Journal of China Hydrology,1998(2):31-36. (in Chinese))

[ 9 ] GB/50179—1993 河流流量测验规范 [ S ].

[ 10 ] 高健,张志林.ADCP与转子式流速仪在潮汐河段脉动性分析比较 [ J ]. 水利水文自动化,2005,11(6):16-20. ( GAO Jian, ZHANG Zhilin. Comparative analysis on pulsation properties of rotating element current meters and ADCP in tidal reaches flow measurement [ J ]. Automation in Water Resources and Hydrology,2005,11(6):16-20. (in Chinese))

(收稿日期:2013-04-23 编辑:彭桃英)

(上接第 54 页)

[ 15 ] 王劲松,费晓玲,魏锋.中国西北近 50a 来气温变化特征的进一步研究 [ J ]. 中国沙漠,2008,28(4):724-732. ( WANG Jinsong, FEI Xiaoling, WEI Feng. Further study of temperature change in Northwest China in recent 50 years [ J ]. Journal of Desert Research, 2008, 28 ( 4 ): 724-732. (in Chinese))

[ 16 ] 王鹏祥,杨金虎,张强,等.近半个世纪来中国西北地面气候变化基本特征 [ J ]. 地球科学进展,2007,22(6):649-656. ( WANG Pengxiang, YANG Jinhu, ZHANG Qiang, et al. Climate change characteristic of Northwest China in recent half century [ J ]. Advances in Earth Science, 2007, 22 ( 6 ): 649-656. (in Chinese))

[ 17 ] 王遵娅,丁一汇,何金海,等.近 50 年来中国气候变化特征的再分析 [ J ]. 气象学报,2004,62(2):228-236. ( WANG Zunya, DING Yihui, HE Jinhai, et al. An

updating analysis of the climate change in China in recent 50 years [ J ]. Acta Meteorologica Sinica, 2004, 62 ( 2 ): 228-236. (in Chinese))

[ 18 ] 邹旭恺,张强.近半个世纪我国干旱变化的初步研究 [ J ]. 应用气象学报,2008,19(6):579-687. ( ZOU Xukai, ZHANG Qiang. Preliminary studies on variations in droughts over China during past 50 years [ J ]. Journal of Applied Meteorological Science, 2008, 19 ( 6 ): 579-687 (in Chinese))

[ 19 ] 谢庄,曹鸿兴.北京最高和最低气温的非对称变化 [ J ]. 气象学报,1996,54(4):501-507. ( XIE Zhuang, CAO Hongxing. Asymmetric of change in maximum and minimum temperature in Beijing [ J ]. Acta Meteorologica Sinica, 1996, 54 ( 4 ): 501-507. (in Chinese))

(收稿日期:2013-04-25 编辑:高渭文)